

ANÀlisi MORFOMÈTRICA DEL CARST DE PINACLES MEDITERRANI DE SA MITJANIA (Escorca, Mallorca)

per Angel GINÉS ^{1,2}, Joaquín GINÉS ^{1,2} i Pere M. MIRALLES ²

Resumen

Se presentan los resultados del estudio morfométrico del karst de pináculos mediterráneo de Sa Mitjania, localizado en la parte septentrional de la Serra de Tramuntana (Mallorca). La medida de los principales parámetros que permiten describir la morfología de los pináculos (altura, longitud en planta del eje mayor, longitud del eje menor, superficie, pendiente del eje mayor y pendiente del eje menor) se ha efectuado a partir de una versión digitalizada del mapa de Sa Mitjania a escala 1/2.000, previamente publicado por uno de los autores (J.G.) en 1990. Destaca la elevada densidad de pináculos, más de 10 por hectárea, y la considerable proporción de terreno, evaluable en torno al 10% de la superficie exokárstica, que aparece ocupada por pequeños pináculos y especialmente por grandes peñascos residuales de formas también puntiagudas. Más de un 10% de los pináculos superan los 10 metros de altura, mientras que en sus flancos predominan pendientes superiores a los 45°, lo que contribuye a que este tipo de parajes kársticos sean difícilmente transitables y se distinguen por su paisaje muy agreste. Debido a que Sa Mitjania constituye un ejemplo notable, pero al mismo tiempo bastante representativo de los campos de lapiaz que tanto abundan en la Serra de Tramuntana, los datos morfométricos recolectados en los más de un centenar de pináculos muestreados en esta localidad permiten establecer comparaciones, en términos estadísticos, con otros karsts de pináculos desarrollados en diversas condiciones bioclimáticas, como es el caso de algunos famosos karsts intertropicales.

Abstract

The results of the morphometrical study of the mediterranean pinnacle karst of Sa Mitjania, located in the northern part of Serra de Tramuntana range (Mallorca), are presented in this paper. The measurement of the main parameters allowing a description of the pinnacles' morphology (height, plan length of the major axis, length of the minor axis, area, slope dipping along the major axis and dipping along the minor axis) has been performed on a digitalized version of the 1/2,000 scale map of Sa Mitjania, previously published by one of the authors (J.G.) in 1990. It is worth to mention the high density of pinnacles (more than 10 pinnacles per hectare) and the substantial proportion of surface (around a 10% of the exokarstic area) that appear occupied by small pinnacles and especially by big residual rocky hills showing also sharp pointed forms. More than 10% of the pinnacles surpass a height of 10 metres; whereas their slopes predominantly show dips exceeding 45°, which contribute to make these karst areas very rough and wild as well as almost impassable. Due to the fact that Sa Mitjania constitutes a notable example of rocky landscape, quite representative of the karren fields so abundant in the Serra de Tramuntana, the morphometrical data gathered on more than a hundred pinnacles allow an accurate description of that forms in our mediterranean environment; these data could facilitate to establish comparisons, in statistical terms, with other pinnacle karsts developed in diverse bioclimatic conditions, as is the case of some celebrated intertropical karsts.

Introducció

Els camps de lapiaz ocupen extensions molt considerables de la superfície del carst en climes alpins, mediterranis, semiàrids i intertropicals humits. Les seves característiques topogràfiques es diversifiquen en funció dels condicionants climàtics, de forma que els relleus resultants poden assolir trets molt espectaculars i fins i tot

determinar el tipus de paisatge, així com l'evolució i el funcionament hidrològic del conjunt de l'exocarst. El cas més extrem de relleu càrstic dominat pel desenvolupament del lapiaz és el **carst de pinacles** (*pinnacle karst* en anglès), que té com a localitats de més anomenada: els Pinnacles de Gunung Api (Sarawak, Malàisia), el Shilin (*stone forest*) de Lunan (Yunnan, Xina), els Tsingy de Bemaraha i Ankarana (Madagascar), els "bluffs" de Chillagoe (Queensland, Austràlia) i els impressionants costers de Mount Kaijende (Papua Nova Guinea).

1 Grup Espeleològic EST. Palma de Mallorca.

2 Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears.

L'interès per aquests tipus de carst es va anar consolidant a la bibliografia geomorfològica des que WILLIAMS (1972), en classificar els principals tipus de carst poligonal de Nova Guinea, va encunyar el terme *arête and pinnacle karst*. Publicacions posteriors han contribuït a divulgar i descriure els principals exemples de *carst de pinacles* intertropicals i subtropicals d'influència monsonica (OSMASTON, 1980; JENNINGS, 1985; CHEN *et al.*, 1986; FORD *et al.*, 1996; FORD & WILLIAMS, 2007; DAY & WALTHAM, 2009; GRIMES, 2009; SALOMON, 2009).

Per la seva part, BÖGLI (1980) dedica un apartat als pinacles (*Spitzkarren* en alemany) i fa les següents consideracions: "Els pinacles són formes de lapiaz madures... Necessiten un llarg temps per formar-se. Òbviament no basta amb el període Postglacial. Per consegüent, són força rars en els Alps, on només es poden trobar en àrees especialment protegides fora de l'abast de l'acció del gel en moviment. En canvi es troben freqüentment en regions no afectades per les glaceres, com ara la regió mediterrània, ja que n'abunden en moltes localitats. Els pinacles són predominants en els tròpics, on assolixen grans dimensions..."

Malauradament les referències bibliogràfiques disponibles contenen una informació morfomètrica molt minsa i la mida dels pinacles s'avalua en la majoria dels

treballs de manera tan sols aproximada: al voltant de 45 metres d'altura segons OSMASSTON (1980); fins a 30 metres segons DREW (1985); entre 1 i 35 metres segons CHEN *et al.* (1986); entre 20 i 40 metres segons FORD *et al.* (1996); entre 1 i 35 metres d'altura i 1 a 20 metres de diàmetre segons FORD & WILLIAMS (2007); fins a 80 metres als Tsingy de Madagascar (SALOMON, 2009); i fins a 120 metres d'altura a Mount Kaijende (WILLIAMS, 2009). Segurament les dades que forneixen DAY & WALTHAM (2009) són les més detallades al respecte: basant-se en un mostreig només aproximatiu, fet a la localitat típica de Gunung Api (illa de Borneo), aquests autors indiquen que el 20% dels pinacles tenen més de 20 metres d'altura (amb exemplars de fins a 50 m), mentre que al voltant del 30% no assolixen una mida de 2 metres i el 50% no superen els 5 metres; dades que suggereixen que l'altura dels pinacles no segueix una distribució normal.

Els carsts de pinacles mediterranis compten amb una bibliografia més aviat escassa, encara que les muntanyes de la costa dalmata i de l'illa de Mallorca mostren exemples ben destacats d'aquest tipus d'exocarst. Es tracta de paisatges, sens dubte, no tan excepcionals com la majoria dels carsts de pinacles tropicals, però així i tot sembla prou significatiu que quasi tots els tre-



Figura 1: Típic paisatge de la part meridional del carst de pinacles de Sa Mitjana. Els costers escarpats que ocupen el rerefons de la imatge corresponen al Pas de n'Argentó i, en darrer terme, al Puig Major.

Figure 1: Typical landscape in the southern part of the pinnacle karst of Sa Mitjana. The cliffs in the rear of the picture correspond to Pas de n'Argentó area and, in the background, to the Puig Major.

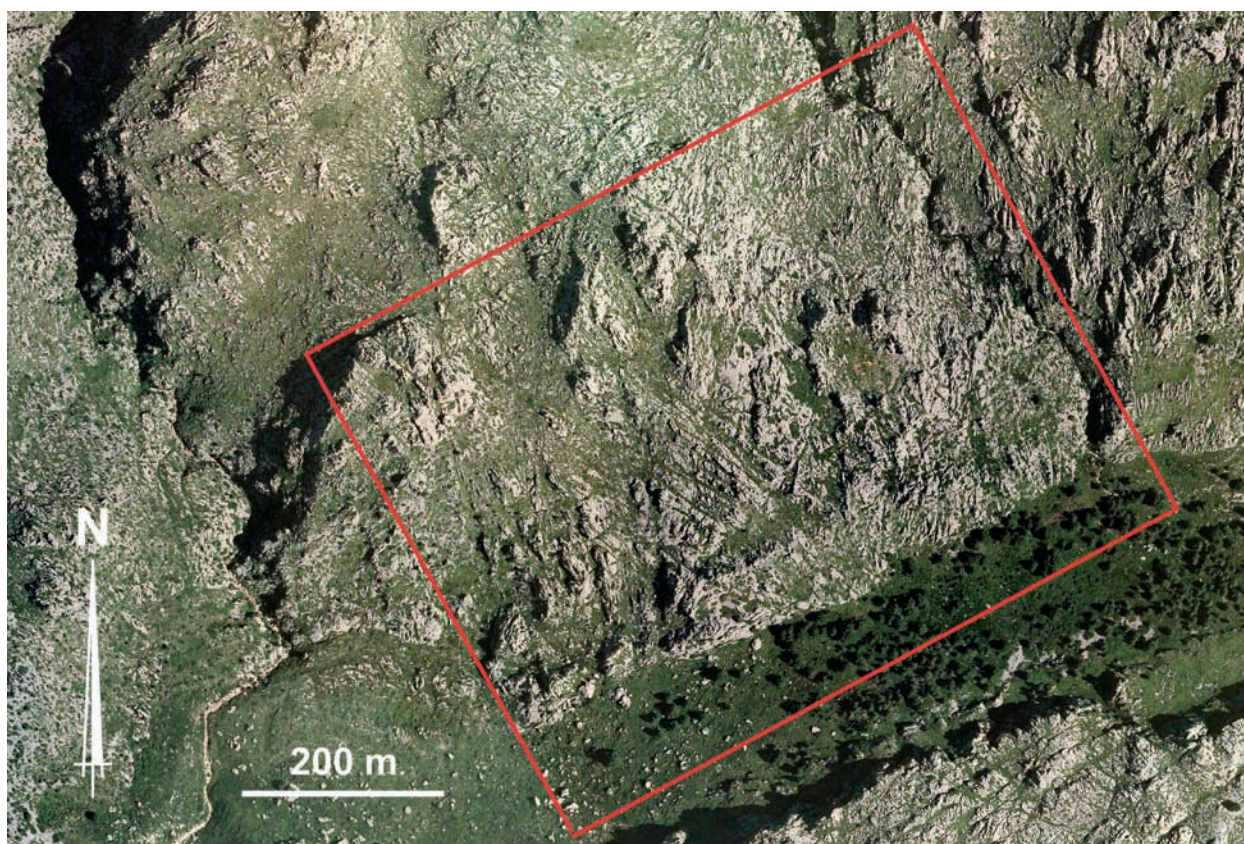


Figura 2: Ortofotografia del carst de Sa Mitjania i dels seus voltants (Sa Coma de Bini al Sud i els torrents del Gorg des Diners i de s'Al-lot Mort a l'Est i a l'Oest respectivament). El rectangle vermell indica els límits de la zona cartografiada. Aquesta imatge correspon al PNOA-2008.

Figure 2: Orthophotography of the karst area of Sa Mitjania and its surroundings (Sa Coma de Bini to the south as well as Gorg des Diners and s'Al-lot Mort creeks to the east and west respectively). The red rectangle indicates the limits of the mapped area. This image corresponds to PNOA-2008.

balls que inclouen descripcions dels camps de lapiaz de la Serra de Tramuntana mallorquina insisteixen reiteradament en la presència d'espectaculars piràmides, crestes (*ridges*) i pinacles (*pinnacles*) de lapiaz (GINÉS *et al.*, 1979; BÄR, 1989; GINÉS & GINÉS, 1989 i 1995; GINÉS, 1998; entre d'altres).

Pel que fa a les dimensions dels pinacles mallorquins, són molt poques les dades numèriques concretes que han estat publicades: SMART & WHITAKER (1996) documenten crestalls d'entre 1 i 15 metres d'altura, que mostren pendents compreses entre 20° i 80°; GINÉS (1998), fent uns comentaris generals sobre els camps de lapiaz de la Serra de Tramuntana, escriu textualment: "Les roques... sobresurten enmig de la vegetació i dels esquerps roquissars, i formen pinacles, crestes i piràmides de lapiaz (*karren pinnacles*) d'entre 5 i 20 metres d'alçada"; finalment, GINÉS & GINÉS (2009) indiquen que "...els nombrosos carsts de pinacles estan constituïts per conjunts de piràmides que molt sovint superen els 10 m d'altura i els 200 m² de superfície, els quals queden separats per profundes esquerdes...". Però, a part de la informació continguda en totes aquestes publicacions —on no falten dades de caràcter fonamentalment descriptiu sobre les microformes de lapiaz que mostren els costers carstificats dels pinacles—, dues de les localitats més representatives de la Serra de Tramuntana (Es Clots Carbons i Sa Mitjania) varen ser cartografiades a escala 1/2.000 per un dels autors (J.G.) a finals de la

dècada dels vuitanta i apareixen publicades respectivament a GINÉS & GINÉS (1989) i GINÉS (1990). Els mapes resultants constitueixen un material potencialment molt valuós per a la realització d'estudis morfomètrics, com intentarem demostrar en el present treball.

Metodologia utilitzada per a l'anàlisi morfomètrica dels pinacles

Algunes de les característiques més notables dels carsts de pinacles estan relacionades amb el relleu molt accidentat que presenten i que els fa, de vegades, intransitables i, en alguns casos extrems, gairebé inacessibles. A més de la verticalitat de les parets i flancs dels pinacles, solcats per profunds canals (*rinnenkarren*) i amb arestes esmolades per microformes de lapiaz, els pinacles apareixen espaiats freqüentment per escllexes molt profundes, ocupades per la vegetació. Tot això contribueix a que la feina topogràfica de camp sigui molt difícil en aquestes condicions. A més a més, portar a terme un mostreig estadísticament significatiu esdevé una tasca desproporcionadament àrdua i fastijosa dins

un terreny tan esquerp i poc uniforme a escala humana. Emperò, els pinacles i crestalls tenen unes mides a bastament grans que permeten la seva observació mitjançant tècniques de teledetecció, com ara la fotografia aèria i els seus derivats cartogràfics. I és aquesta aptitud per a la seva discriminació i identificació en fotografia aèria la que pot donar més avantatges als estudis morfomètrics dels pinacles basats en diversos productes cartogràfics, sempre que aquests tinguin un nivell de resolució adient.

Va ser, precisament, la disponibilitat prèvia d'una cartografia geomorfològica detallada del promontori carstificat de Sa Mitjania (Figura 1) —una localitat ben representativa dels camps de lapiaz de la muntanya mallorquina— el punt de partida per a desenvolupar aquesta primera temptativa d'anàlisi morfomètrica d'un carst de pinacles mediterrani. El material cartogràfic base sobre el que s'ha treballat, consisteix en un mapa a escala 1/2.000 que fou elaborat a l'*Empresa Municipal d'Informàtica S.A.* (actualment *IMI*) de Palma de Mallorca, utilitzant un restituïdor analític Matra T-1 que va permetre aplicar les tècniques fotogramètriques sobre parells estereoscòpics de fotogrames aeris a escala 1/15.000. Del producte cartogràfic original s'ha realitzat recentment una nova versió en format DGN, per tal de facilitar el seu tractament informàtic. La cartografia geomorfològica produïda, que ja es va publicar a GINÉS (1990), permet copsar l'impressionant paratge càrstic amb tota la complexitat del seu relleu, però també permet efectuar amidaments de diversos descriptors morfomètrics amb una precisió a bastament satisfactòria, sempre dins els límits que imposa l'equidistància de corbes de nivell, que en aquest cas és de 2 metres. L'elecció de Sa Mitjania com a exemple de carst de pinacles està prou justificada per les característiques que presenten els seus camps de lapiaz; però, a més a més, es tracta d'una localitat relativament petita, que presenta uns límits geogràfics còmodes de definir i que, per tant, es pot estudiar amb facilitat d'una manera exhaustiva i individualitzada (Figures 2 i 3).

Els resultats de l'anàlisi morfomètrica dels pinacles de Sa Mitjania apareixen resumits als apartats que vénen a continuació i han estat desenvolupats i estructurats amb uns criteris metodològics senzills: 1) l'estratègia de mostreig adoptada ha consistit, primer de tot, en identificar tots els elements topogràfics prominents que es podien discriminar a la cartografia esmentada, per tal de tabular per a cada un d'ells les mesures corresponents de cada descriptor; 2) totes les dades morfomètriques obtingudes i recol·lectades a la Taula I provenen

de l'amidament efectuat sobre la cartografia esmentada (algunes han estat calculades gràficament de forma manual, però en altres casos s'han fet servir tractaments informàtics a partir de la seva versió digitalitzada); 3) la selecció dels paràmetres a mesurar en cada pinacle ha estat condicionada per la intenció de donar a l'estudi un enfocament fonamentalment descriptiu, però obert també a possibles interpretacions genètiques; 4) els valors numèrics corresponents a cada pinacle (tal com apareixen a la Taula I) consten de nou mides o dades: altura, longitud de l'eix major, longitud de l'eix menor, superfície, relació entre l'eix major i l'eix menor, pendent de l'eix major, pendent de l'eix menor, cota a peu de pinacle i cota de cim de pinacle; 5) en base al tractament estadístic efectuat sobre les mesures obtingudes s'han pogut inferir una sèrie d'estimacions sobre l'altura, la superfície, la forma en planta i els pendents dels costers dels pinacles, així com també sobre possibles nivells de relleixos i cims relacionats amb ells; 6) al mateix temps, s'ha plantejat (amb una mostra significativa de 104 individus) el problema de la tipologia dels pinacles i s'ha fet un intent de quantificar el percentatge de superfície càrstica ocupada per pinacles i la seva concentració per unitat de superfície; 7) finalment, cal remarcar que aquest treball té un caire pioner pel que fa a l'ús de tècniques de teledetecció en l'estudi morfomètric del lapiaz (a nivell dels diferents tipus d'exocarst existents) i que, precisament per això, s'ha defugit deliberadament d'introduir en ell altres dades de camp complementàries.

Tipologia dels pinacles

A diferència de la majoria de les formes de lapiaz, els pinacles constitueixen formes prominents —és a dir, en relleu— que quan assoleixen un important grau de desenvolupament poden caracteritzar els camps de lapiaz i fins i tot el conjunt de l'exocarst, imposant-se a les dolines o depressions càrstiques en la topografia d'alguns paratges càrstics mediterranis i tropicals.

Aquest és el cas de Sa Mitjania, però també d'altres nombroses localitats de la Serra de Tramuntana, on la presència de grans piràmides de lapiaz ha estat documentada reiteradament; com per exemple a GINÉS *et al.* (1979), BÄR (1989), GINÉS & GINÉS (1989), GINÉS (1990), SMART & WHITAKER (1996), GINÉS (1998) i GINÉS & GINÉS (2009). Les esmentades referències bibliogràfiques descriuen aquestes formes prominents

Figura 3: Cartografia geomorfològica detallada del paratge càrstic de Sa Mitjania. Es tracta d'una nova versió del mapa a escala 1/2.000 que fou elaborat a l'*Empresa Municipal d'Informàtica S.A.* (actualment *IMI*) de Palma i que es va publicar a GINÉS (1990). Projecció UTM; datum ED50. Equidistància de les corbes de nivell: 2 metres.

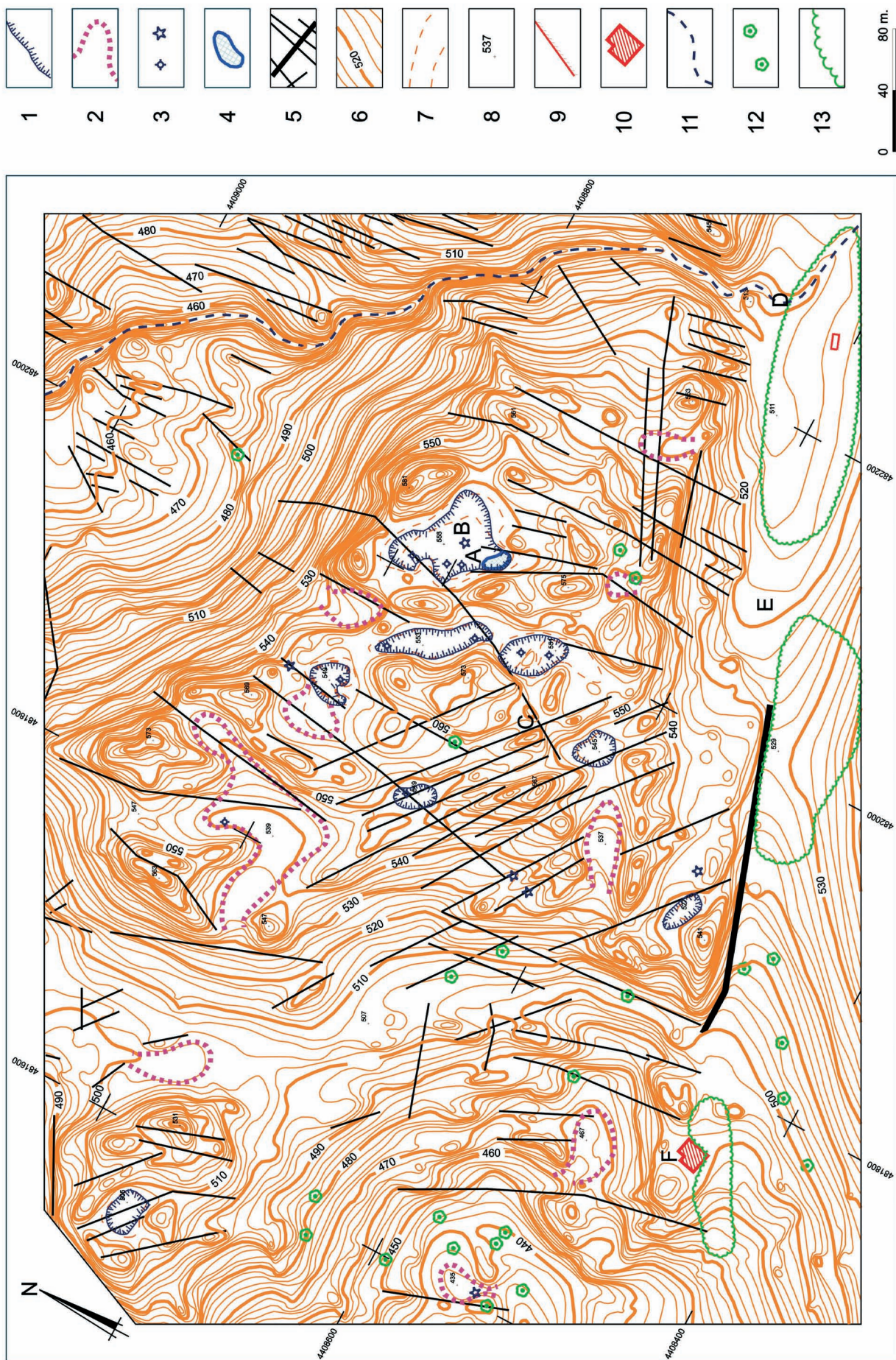
A: Avenc de Sa Mitjania; B: Avenc Petit de Sa Mitjania; C: Avenc Públic; D: Torrent des Gorg des Diners; E: Coma de Bini; F: Casa des Moro.

1: fons de dolina amb cobertura edàfica; 2: dolina oberta; 3: engolidor, petit avenc; 4: avenc; 5: fractures eixamplades per dissolució; 6: corbes de nivell; 7: corbes de depressió; 8: cota altimètrica; 9: paret de pedra seca; 10: construcció; 11: torrent; 12: arbres; 13: massa arbòria.

Figure 3: Detailed geomorphological map of the karst area of Sa Mitjania. It is a recent version of the 1/2,000 map performed in the Empresa Municipal d'Informàtica S.A. (currently IMI) from Palma, that was previously published by GINÉS (1990). UTM projection; ED50 datum. Contours interval: 2 metres.

A: Avenc de Sa Mitjania; B: Avenc Petit de Sa Mitjania; C: Avenc Públic; D: Torrent des Gorg des Diners; E: Coma de Bini; F: Casa des Moro.

1: doline bottom covered with soil; 2: opened doline; 3: swallow-hole, small pit; 4: shaft; 5: solutionally enlarged fractures; 6: contours; 7: contours in depressed areas; 8: elevation point; 9: stone wall; 10: building; 11: creek; 12: trees; 13: forest area.



com a: piràmides, crestes, *spitzkarren*, torrelles, crestalls, *ridges* i, més recentment, com a pinacles. Emperò, l'ús cada vegada més generalitzat de l'expressió *carst de pinacles* per a aquest tipus de paisatges càrstics, esquerps i quasi intransitables, ens ha convidat a utilitzar aquí de manera preferent el terme *pinacle*, però amb unes certes matisacions.

D'una banda, és necessari reconèixer que els relleus càrstics positius mostren una gran complexitat de forma, altura i mida, i no sempre és fàcil individualitzar els diferents pinacles pel que fa al seu tractament morfomètric. Si bé qualsevol prominència destacada queda reflectida als mapes topogràfics en forma d'una corba de nivell tancada (tal com s'aprecia a la Figura 3, elaborada amb una equidistància entre corbes de nivell de 2 metres), és freqüent que els relleus presentin diversos cims encara que comparteixin una mateixa base. Per això hem introduït una classificació que distingeix entre *pinacles simples* i *complexos de pinacles*; o, dit amb altres paraules, entre **relleus simples** i **relleus complexos** (Figura 4). Els pinacles simples són aquells que només mostren un únic cim o nucli destacat, segons el

poder de resolució que ens dona el mapa topogràfic de base (Figures 3 i 4). Per contra, els relleus complexos són aquells on hi podem trobar més d'un cim dins un mateix relleu, encara que la seva identitat topogràfica queda clarament delimitada per una corba de nivell tancada que els envolta per complet (Figura 4). Aquesta diferenciació es fa necessària per tal d'establir, de bon començament, un primer criteri d'individualització per a cada element a mesurar. A la Figura 5 es pot apreciar la decisió adoptada, de manera que els pinacles simples apareixen en color blau i els relleus complexos, que inclouen diversos pinacles, apareixen delimitats amb un color perifèric vermell.

D'altra banda, cal tenir en compte una diferència substancial pel que fa a la grandària dels elements topogràfics a considerar. Per norma general, els pinacles o relleus simples tenen una mida molt més petita i una menor altura i superfície que els complexos de pinacles, i són els que de fet apareixen descrits a la bibliografia com a pinacles o *spitzkarren*. En canvi, com és de suposar, els relleus complexos tenen unes dimensions molt més grans i abracen grups de pinacles simples dins el seu

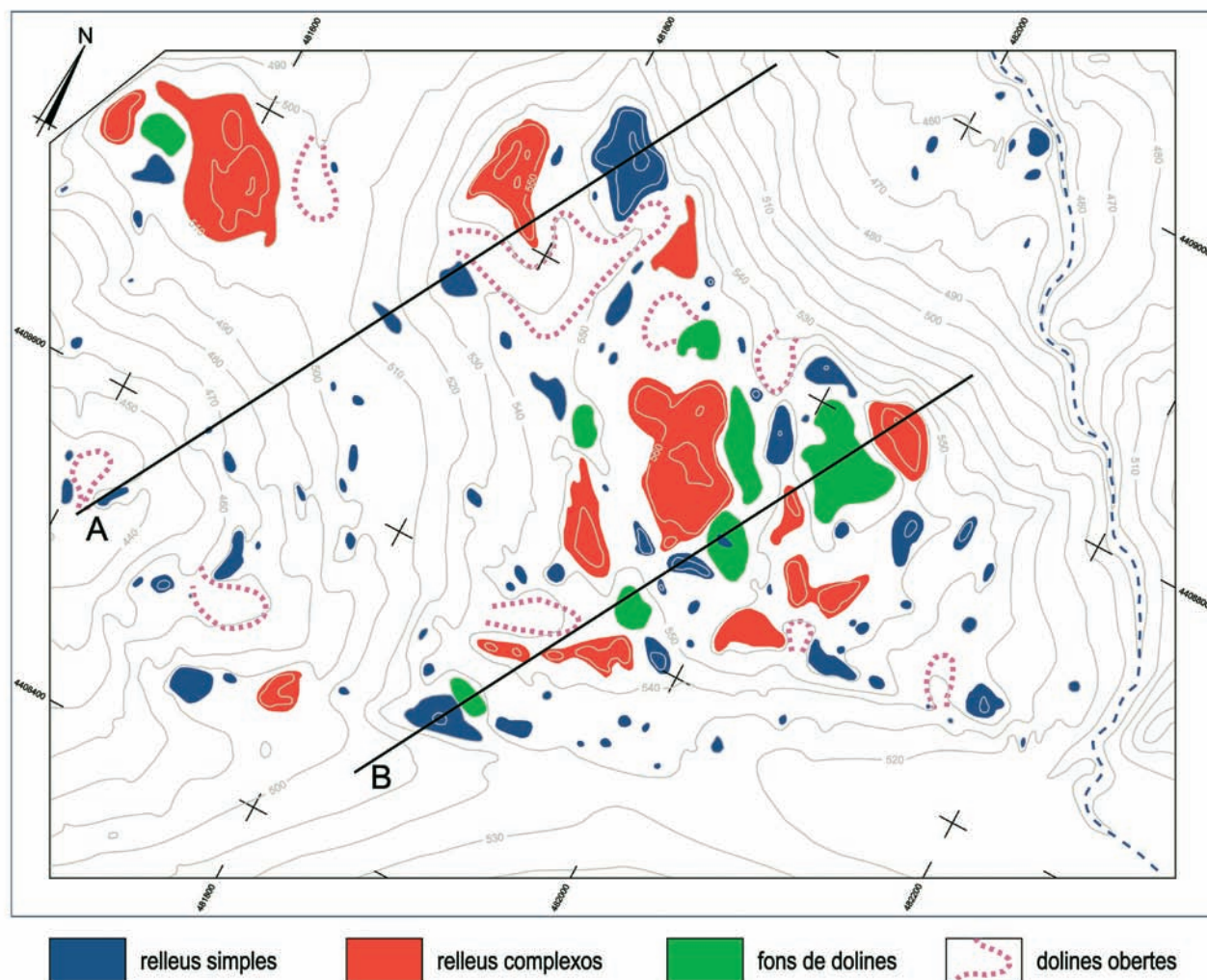


Figura 4: Mapa esquemàtic i simplificat de Sa Mitjania. Els 104 pinacles *lato sensu* mostrejats apareixen assenyalats en color blau (pinacles simples) i en color vermell (complexos de més d'un pinacle). Els dos talls topogràfics paral·lels A i B es poden consultar a la Figura 12.

Figure 4: Schematic and simplified map of Sa Mitjania. The 104 sampled pinnacles *lato sensu* appear represented in blue (simple pinnacles) and in red colour (complexes including more than one pinnacle). The two parallel topographic profiles A and B are displayed in Figure 12.

límit. Emperò, en alguns casos, es troben relleus simples de gran mida i superfície als quals difícilment escau la denominació de pinacles (vegeu-ne un clar exemple a la Figura 4, concretament a l'extrem septentrional del perfil A). És per això que ens hem permès distingir entre **pinacles** (Figura 6) i **penyals càrstics** (Figura 7).

Així doncs, els **pinacles** serien aquells relleus simples, produïts per l'activa erosió càrstica que es manifesta mitjançant el creixement de formes de lapiaz en tota la seva extensió, i que no arriben a superar els 200 m² de superfície. Complementàriament, els **penyals càrstics** serien aquells relleus residuals de grans dimensions, simples o complexos, que assolixen una extensió superior als 300 m², sense importar el nombre de cims que puguin presentar ni el grau de desenvolupament de les morfologies de lapiaz. Cal destacar que la diferenciació que aquí s'estableix, entre pinacles i penyals, no és estrictament rígida, sinó que correspon a una gradació contínua que va des dels pinacles més representatius i abundants (entre 5 i 20 m² de superfície i de 2 a 4 m d'altura) fins als grans penyals (de més de 3.000 m² de superfície), passant per relleus intermedis que suposarien una transició gradual entre pinnacle i penyal.

La distinció entre relleus simples i complexos (segons el nombre de cims de cada prominència) i entre pinacles i penyals (segons les seves dimensions i la modalitat de carstificació que presenten aquests relleus) serà present tot al llarg dels apartats següents, especialment amb la intenció de clarificar la metodologia utilitzada i també amb la pretensió de facilitar la interpretació de la taula de dades (Taula I) i de les corresponents gràfiques descriptives.

Densitat dels pinacles

En el promontori de Sa Mitjania, que ha estat seleccionat per a la realització d'aquest estudi (Figura 3), així com a molts d'altres camps de lapiaz de la Serra de Tramuntana, la intensa carstificació ha donat lloc a uns paisatges que presenten nombrosos pinacles verticalitzats, els quals hi predominen clarament en comparació amb una quantitat de dolines i depressions càrstiques més aviat escassa. Es tracta d'un relleu exocàrstic caracteritzat per piràmides de lapiaz punxegudes i ben individualitzades, separades freqüentment per pregons corredors càrstics, i que, només de manera esporàdica, mostren diverses dolines intercalades entre mig dels conjunts de pinacles. Per això, una primera quantificació de la proporció en què les formes prominents —en relleu positiu— hi dominen sobre les formes còncaves —en depressió— es podria expressar de forma prou senzilla mitjançant un simple recompte del nombre de pinacles i de dolines per unitat de superfície.

Els càlculs efectuats sobre la totalitat de la zona carstificada que apareix a la Figura 3 (amb exclusió de la vorera oriental del Torrent des Gorg des Diners i de la part boscosa de Sa Coma de Bini) donen una superfície aproximada de 312.000 m² de camps de lapiaz, mentre que tan sols permeten detectar la presència de 8 dolines, concentrades quasi totes en el sector central de Sa

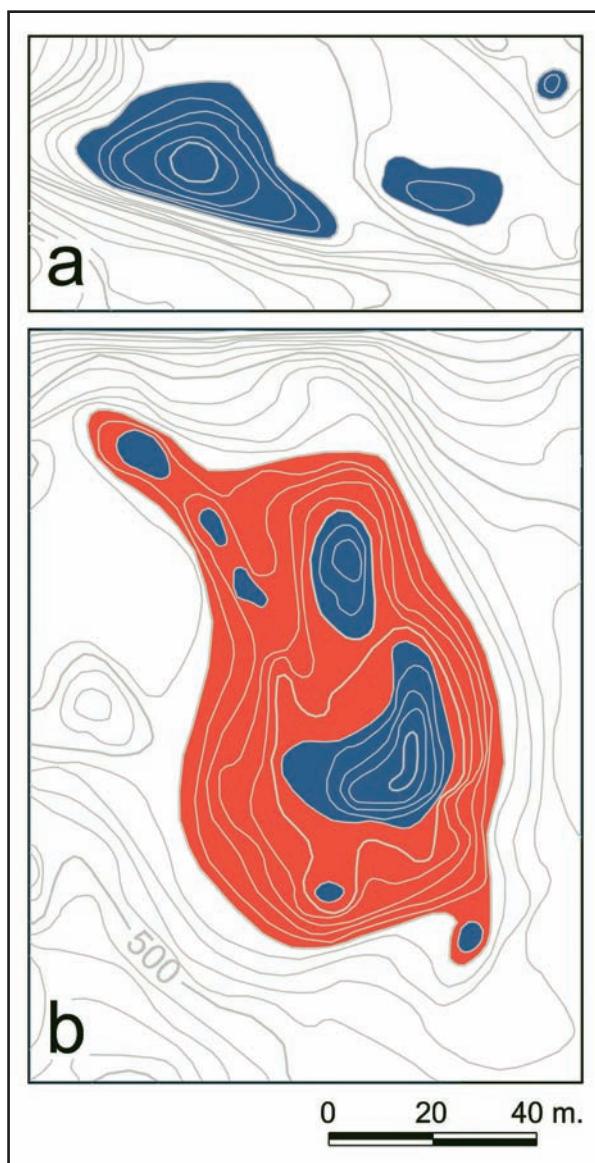


Figura 5: Exemples de pinacles simples i pinacles complexos. **a)** en blau, tres pinacles simples; **b)** en vermell, complex de pinacles constituït per un conjunt de set pinacles simples, els quals apareixen marcats en color blau.

Figure 5: Examples of simple and complex pinnacles. **a)** in blue, three simple pinnacles; **b)** in red, a complex of pinnacles constituted by a group of seven simple pinnacles, which are depicted in blue colour.

Mitjania (Figura 4). En canvi, la catalogació de la totalitat dels relleus positius que es poden reconèixer topogràficament (d'acord amb el poder de resolució que proporciona l'equidistància de corbes de nivell de 2 m) ens ha permès la identificació de 79 pinacles i 25 penyals (Taula I); és a dir, 104 pinacles *lato sensu*. Si, a més a més, es pren en compte que 13 d'aquests penyals són, de fet, pinacles complexos, que presenten un nombre addicional de 27 cims més, el recompte exhaustiu de pinacles simples pujaria fins a 131. Això suposa una **densitat de pinacles** de, com a mínim, 4,2 pinacles per hectàrea i un aclaparador predomini dels pinacles sobre les dolines pel que fa a la quantitat d'elements topogràfics observables a la cartografia de la zona mostrejada.

| Relleu | Altura [m] | Eix major (A) [m] | Eix menor (b) [m] | Superfície [m²] | A/b | Pendent (A) [°] | Pendent (b) [°] | Cota peu [m] | Cota cim [m] |
|--------|---------------|----------------------|----------------------|--------------------|-----|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| simple | 2 | 3,6 | 1,8 | 4,8 | 2,0 | 48 | 66 | 495 | 497 |
| simple | 2 | 2,8 | 2,6 | 5,0 | 1,1 | 55 | 57 | 541 | 543 |
| simple | 2 | 3,1 | 2,2 | 5,3 | 1,4 | 52 | 61 | 469 | 471 |
| simple | 2 | 5,1 | 1,9 | 8,7 | 2,7 | 38 | 65 | 493 | 495 |
| simple | 2 | 4,2 | 3,3 | 9,8 | 1,3 | 44 | 50 | 539 | 541 |
| simple | 2 | 4,0 | 3,2 | 10,7 | 1,3 | 45 | 51 | 533 | 535 |
| simple | 2 | 5,0 | 3,0 | 11,5 | 1,7 | 39 | 53 | 473 | 475 |
| simple | 2 | 5,0 | 2,9 | 11,8 | 1,7 | 39 | 54 | 553 | 555 |
| simple | 2 | 4,7 | 3,5 | 12,6 | 1,3 | 40 | 49 | 535 | 537 |
| simple | 2 | 6,1 | 2,7 | 12,7 | 2,3 | 33 | 56 | 521 | 523 |
| simple | 2 | 5,6 | 2,9 | 12,9 | 1,9 | 36 | 54 | 553 | 555 |
| simple | 2 | 5,2 | 3,9 | 14,1 | 1,3 | 38 | 46 | 467 | 469 |
| simple | 2 | 4,7 | 4,0 | 14,2 | 1,2 | 40 | 45 | 567 | 569 |
| simple | 2 | 7,1 | 2,7 | 14,6 | 2,6 | 29 | 56 | 477 | 479 |
| simple | 2 | 6,2 | 2,5 | 15,0 | 2,5 | 33 | 58 | 561 | 563 |
| simple | 2 | 6,0 | 3,1 | 15,1 | 1,9 | 34 | 52 | 507 | 509 |
| simple | 2 | 5,2 | 4,4 | 18,3 | 1,2 | 38 | 42 | 555 | 557 |
| simple | 2 | 6,1 | 3,8 | 18,7 | 1,6 | 33 | 46 | 537 | 539 |
| simple | 2 | 5,4 | 4,7 | 19,2 | 1,1 | 37 | 40 | 561 | 563 |
| simple | 2 | 6,9 | 3,6 | 20,5 | 1,9 | 30 | 48 | 559 | 561 |
| simple | 2 | 5,6 | 4,8 | 21,0 | 1,2 | 36 | 40 | 559 | 561 |
| simple | 2 | 6,1 | 4,5 | 21,7 | 1,4 | 33 | 42 | 555 | 557 |
| simple | 2 | 6,5 | 4,6 | 21,7 | 1,4 | 32 | 41 | 533 | 535 |
| simple | 2 | 6,9 | 4,0 | 21,9 | 1,7 | 30 | 45 | 505 | 507 |
| simple | 2 | 6,1 | 4,6 | 23,2 | 1,3 | 33 | 41 | 545 | 547 |
| simple | 2 | 8,2 | 3,8 | 23,5 | 2,2 | 26 | 46 | 461 | 463 |
| simple | 2 | 7,0 | 5,0 | 23,6 | 1,4 | 30 | 39 | 503 | 505 |
| simple | 4 | 7,9 | 3,9 | 25,1 | 2,0 | 43 | 71 | 463 | 467 |
| simple | 2 | 7,2 | 5,4 | 28,4 | 1,3 | 29 | 37 | 439 | 441 |
| simple | 4 | 6,3 | 5,5 | 28,5 | 1,1 | 48 | 61 | 539 | 543 |
| simple | 2 | 7,0 | 5,4 | 28,6 | 1,3 | 30 | 37 | 459 | 461 |
| simple | 2 | 9,3 | 4,0 | 29,1 | 2,3 | 23 | 45 | 503 | 505 |
| simple | 2 | 6,8 | 5,4 | 29,3 | 1,3 | 30 | 37 | 561 | 563 |
| simple | 2 | 8,8 | 4,1 | 29,4 | 2,1 | 24 | 44 | 529 | 531 |
| simple | 2 | 9,0 | 4,2 | 29,5 | 2,1 | 24 | 44 | 467 | 469 |
| simple | 2 | 7,3 | 5,5 | 29,7 | 1,3 | 29 | 36 | 537 | 539 |
| simple | 2 | 10,7 | 3,5 | 30,0 | 3,1 | 20 | 49 | 491 | 493 |
| simple | 4 | 6,6 | 6,3 | 32,3 | 1,1 | 50 | 52 | 557 | 561 |
| simple | 2 | 10,3 | 3,7 | 34,4 | 2,8 | 21 | 47 | 555 | 557 |
| simple | 2 | 8,1 | 5,6 | 34,7 | 1,4 | 26 | 36 | 507 | 509 |
| simple | 4 | 10,2 | 4,4 | 36,3 | 2,3 | 38 | 66 | 557 | 561 |
| simple | 2 | 10,6 | 4,5 | 36,4 | 2,4 | 21 | 42 | 559 | 561 |
| simple | 2 | 8,7 | 5,6 | 38,6 | 1,6 | 25 | 36 | 559 | 561 |
| simple | 4 | 9,0 | 5,6 | 39,9 | 1,6 | 35 | 60 | 491 | 495 |
| simple | 2 | 8,3 | 6,8 | 40,2 | 1,2 | 26 | 30 | 465 | 467 |
| simple | 2 | 8,6 | 7,2 | 42,4 | 1,2 | 25 | 29 | 533 | 535 |
| simple | 2 | 7,3 | 7,3 | 44,6 | 1,0 | 29 | 29 | 529 | 531 |
| simple | 2 | 11,1 | 5,1 | 45,0 | 2,2 | 20 | 38 | 551 | 553 |
| simple | 2 | 9,3 | 6,3 | 46,0 | 1,5 | 23 | 32 | 555 | 557 |
| simple | 4 | 10,8 | 5,6 | 46,9 | 1,9 | 35 | 16 | 501 | 505 |
| simple | 2 | 8,3 | 7,4 | 47,5 | 1,1 | 26 | 28 | 537 | 539 |
| simple | 4 | 10,7 | 6,2 | 47,7 | 1,7 | 33 | 58 | 501 | 505 |
| simple | 4 | 8,7 | 7,0 | 48,7 | 1,2 | 32 | 63 | 567 | 571 |
| simple | 4 | 8,7 | 7,5 | 50,0 | 1,2 | 37 | 48 | 557 | 561 |
| simple | 2 | 11,1 | 6,1 | 50,2 | 1,8 | 20 | 33 | 465 | 467 |
| simple | 2 | 12,5 | 5,0 | 51,5 | 2,5 | 18 | 39 | 551 | 553 |
| simple | 2 | 11,0 | 6,3 | 55,1 | 1,7 | 20 | 32 | 467 | 469 |
| simple | 2 | 13,5 | 5,5 | 58,7 | 2,5 | 17 | 36 | 547 | 549 |

| | | | | | | | | | |
|------------------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------------|-------------|-----|-----|
| simple | 2 | 11,8 | 7,0 | 62,2 | 1,7 | 19 | 30 | 547 | 549 |
| simple | 2 | 13,0 | 6,0 | 62,2 | 2,2 | 17 | 34 | 545 | 547 |
| simple | 2 | 10,8 | 7,5 | 63,0 | 1,4 | 20 | 28 | 529 | 531 |
| simple | 2 | 11,0 | 7,6 | 63,7 | 1,4 | 20 | 28 | 557 | 559 |
| simple | 4 | 10,8 | 8,4 | 69,5 | 1,3 | 33 | 52 | 561 | 565 |
| simple | 6 | 13,5 | 7,0 | 72,6 | 1,9 | 34 | 63 | 533 | 539 |
| simple | 4 | 13,9 | 6,7 | 73,4 | 2,1 | 22 | 51 | 471 | 475 |
| simple | 4 | 10,3 | 9,0 | 78,1 | 1,1 | 38 | 42 | 549 | 553 |
| simple | 4 | 17,1 | 5,5 | 78,2 | 3,1 | 22 | 55 | 505 | 509 |
| simple | 4 | 11,9 | 10,9 | 98,7 | 1,1 | 29 | 44 | 551 | 555 |
| simple | 2 | 22,1 | 5,2 | 101,7 | 4,3 | 10 | 38 | 441 | 443 |
| simple | 2 | 16,9 | 7,6 | 104,8 | 2,2 | 13 | 28 | 439 | 443 |
| simple | 4 | 15,1 | 10,9 | 124,5 | 1,4 | 24 | 44 | 467 | 471 |
| simple | 4 | 23,6 | 8,8 | 167,1 | 2,7 | 17 | 50 | 557 | 561 |
| simple | 6 | 23,9 | 9,6 | 174,7 | 2,5 | 21 | 53 | 557 | 563 |
| simple | 4 | 26,6 | 8,4 | 177,1 | 3,2 | 12 | 50 | 519 | 523 |
| simple | 6 | 18,3 | 13,5 | 188,8 | 1,4 | 27 | 50 | 463 | 469 |
| simple | 4 | 23,4 | 9,6 | 210,8 | 2,4 | 19 | 43 | 533 | 537 |
| simple | 6 | 26,7 | 13,2 | 251,2 | 2,0 | 19 | 46 | 547 | 553 |
| simple | 6 | 34,5 | 10,7 | 277,1 | 3,2 | 14 | 52 | 471 | 477 |
| simple | 6 | 31,3 | 11,9 | 284,1 | 2,6 | 20 | 49 | 559 | 565 |
| Pinacles (n=79) | | | | | | | | | |
| mitjana | 2,8 | 10,4 | 5,7 | 55,8 | 1,8 | 29,5 | 45,4 | | |
| min | 2 | 2,8 | 1,8 | 4,8 | 1,0 | 10 | 16 | | |
| max | 6 | 34,5 | 13,5 | 284,1 | 4,3 | 55 | 71 | | |

| Relleu | Altura [m] | Eix major (A) [m] | Eix menor (b) [m] | Superfície [m²] | A/b | Pendent (A) [°] | Pendent (b) [°] | Cota peu [m] | Cota cim [m] |
|-----------------------|---------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| complex | 8 | 35,2 | 9,3 | 291,80 | 3,8 | 38 | 60 | 545 | 553 |
| simple | 6 | 31,0 | 12,4 | 310,20 | 2,5 | 15 | 43 | 557 | 563 |
| simple | 6 | 29,4 | 18,2 | 328,30 | 1,6 | 22 | 28 | 509 | 515 |
| simple | 2 | 36,3 | 12,0 | 348,30 | 3,0 | 6 | 18 | 549 | 551 |
| simple | 10 | 24,3 | 21,3 | 355,10 | 1,1 | 33 | 57 | 543 | 553 |
| simple | 8 | 36,3 | 14,1 | 361,40 | 2,6 | 16 | 70 | 561 | 569 |
| complex | 8 | 39,0 | 13,4 | 389,00 | 2,9 | 15 | 59 | 565 | 573 |
| simple | 8 | 27,3 | 21,5 | 395,40 | 1,3 | 24 | 43 | 539 | 547 |
| simple | 12 | 36,9 | 14,6 | 422,20 | 2,5 | 24 | 62 | 559 | 571 |
| simple | 10 | 37,9 | 14,7 | 458,50 | 2,6 | 27 | 61 | 561 | 571 |
| simple | 6 | 27,5 | 22,2 | 466,70 | 1,2 | 20 | 38 | 491 | 497 |
| simple | 10 | 36,3 | 17,0 | 478,40 | 2,1 | 20 | 55 | 563 | 573 |
| complex | 8 | 31,4 | 23,3 | 547,90 | 1,3 | 21 | 60 | 497 | 505 |
| complex | 8 | 40,0 | 19,6 | 621,30 | 2,0 | 15 | 39 | 507 | 515 |
| complex | 8 | 45,4 | 23,9 | 766,40 | 1,9 | 16 | 50 | 561 | 569 |
| complex | 10 | 54,2 | 19,7 | 807,50 | 2,8 | 13 | 55 | 559 | 569 |
| complex | 8 | 58,8 | 15,7 | 830,80 | 3,7 | 20 | 42 | 547 | 555 |
| simple | 12 | 52,6 | 25,5 | 859,90 | 2,1 | 21 | 52 | 529 | 541 |
| complex | 8 | 54,1 | 20,8 | 1.014,10 | 2,6 | 16 | 54 | 567 | 575 |
| complex | 14 | 78,1 | 23,8 | 1.292,20 | 3,3 | 13 | 55 | 553 | 567 |
| complex | 20 | 57,2 | 32,4 | 1.328,30 | 1,8 | 37 | 63 | 561 | 581 |
| complex | 16 | 83,4 | 41,5 | 2.065,90 | 2,0 | 16 | 61 | 547 | 563 |
| simple | 18 | 73,9 | 47,9 | 2.127,30 | 1,5 | 24 | 57 | 555 | 573 |
| complex | 16 | 113,8 | 48,7 | 4.970,90 | 2,3 | 12 | 52 | 557 | 573 |
| complex | 22 | 128,7 | 60,6 | 5.046,80 | 2,1 | 13 | 50 | 509 | 531 |
| Penyals (n=25) | | | | | | | | | |
| mitjana | 10,5 | 50,8 | 23,8 | 1.075,38 | 2,3 | 19,9 | 51,4 | | |
| min | 2 | 24,3 | 9,3 | 291,80 | 1,1 | 6 | 18 | | |
| max | 22 | 128,7 | 60,6 | 5.046,80 | 3,8 | 38 | 70 | | |

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------------|--------------|-------------|-----------------|------------|-------------|-------------|--|--|
| Pinacles + Penyals (n=104) | | | | | | | | | |
| mitjana | 4,6 | 20,1 | 10,1 | 300,91 | 1,9 | 27,2 | 46,8 | | |
| min | 2 | 2,8 | 1,8 | 4,80 | 1,0 | 6 | 16 | | |
| max | 22 | 128,7 | 60,6 | 5.046,80 | 4,3 | 55 | 71 | | |

Taula I: Paràmetres morfomètrics dels pinacles del promontori càrstic de Sa Mitjania, a la Serra de Tramuntana de Mallorca.

Table I: Morphometrical parameters of the pinnacles in the mediterranean karst area of Sa Mitjania, located in the Serra de Tramuntana mountain range (Mallorca).



Figura 6: Conjunt de tres pinacles individuals, a l'extrem SE del promontori càrstic de Sa Mitjania.

Figure 6: Group of three individual pinnacles, at the SE side of the karst area of Sa Mitjania.

Un aspecte important a avaluar és la precisió que cal atribuir a les dades sobre densitat de pinacles presentades al paràgraf anterior. Certament, el valor de 4,2 pinacles per hectàrea només es pot considerar com una estimació de mínims, ja que molts pinacles tenen mides molt properes, però de vegades inferiors, al límit de resolució de la cartografia que serveix de base per a l'estudi morfomètric; és a dir, al voltant dels 2 metres d'alçada. Les dades, en canvi, són prou fiables per als pinacles superiors als 3 m d'altura. Probablement la millor manera d'apropar-se a un valor de densitat de pinacles més rigorós seria un mostreig de camp fet amb la intenció de calcular un coeficient de correcció entre les dades fonamentades en la cartografia i el nombre de pinacles més petits (d'entre 1 i 3 m) existents a la realitat. Una estimació molt provisional feta sobre el terreny suggereix que fins i tot es poden assolir valors de 10 pinacles per hectàrea, al manco en aquesta localitat.

Entre les possibles formes de mesurar la incidència que tenen en el relleu, i per extensió en la caracterització del paisatge, els dos tipus extrems d'elements topogràfics esmentats –pinacles i dolines (prominències i depressions)– cal analitzar també el percentatge de la superfície total que correspon a cada un d'ells. El tractament informatitzat de les dades cartogràfiques ens ha permès obtenir, per a la totalitat de la zona carstificada, els següents resultats: 31.300 m² de la superfície de Sa Mitjania estan ocupats per pinacles *lato sensu* (dels quals 4.400 m² pertanyen a petits pinacles i 26.900 m² a penyals càrstics de gran mida); 6.545 m² estan constituïts per fons de dolines perfectament tancades; i 10.075 m² formen part de depressions càrstiques obertes (indicades a la Figura 4 com a dolines obertes). Això vol dir que als pinacles de diferents mides els correspon un 10% de la superfície total del terreny, enfront d'un 2% que correspon a les dolines. Evidentment aquestes

estimacions poden fluctuar en funció de la delimitació de l'espai que es prengui en consideració. Però, en qualsevol cas, les dades percentuals són molt semblants: 13% de superfície de pinacles i 3% de superfície de dolines, per exemple, si ens circumscrivim al sector central de Sa Mitjania.

Amb aquestes dades es fa patent la gran importància dels pinacles, grans i petits, simples i complexos, com a elements topogràfics determinants de la majoria dels camps de lapiaz més desenvolupats de la Serra de Tramuntana, com ara Sa Mitjania. És per aquesta raó que ens pareix prou adient qualificar de **Carst de Pinacles** a aquest tipus d'exocarst. Per això, la millor manera d'expressar numèricament les condicions pròpies d'un carst de pinacles potser sigui definir un senzill **índex de relleu P/D** resultant de comparar el percentatge de superfície ocupat pels pinacles amb el percentatge de superfície ocupat per dolines. En el cas de Sa Mitjania l'índex de relleu P/D seria 10/2; és a dir 5. Una proporció a bastament il·lustrativa del predomini dels pinacles a aquest promontori càrstic.

Altura dels pinacles

Més de la meitat dels pinacles que queden enregistrats a la cartografia de Sa Mitjania en què es basa aquest estudi (Figura 3) tenen una altura inferior a 3 m, ja que és la presència de, com a mínim, una corba de nivell tancada, la dada topogràfica que permet la seva identificació com a pinacles individuals. Cal remarcar al respecte que 56 del total de 104 pinacles que apareixen inventariats a la Taula I estan delimitats per una sola corba de nivell, mentre que 18 pinacles més estan de-

limitats per dues corbes consecutives. Aquestes dades indiquen, per tant, que només 30 (és a dir, un 29%) dels relleus prominents que presenta el camp de lapiaz de Sa Mitjania tenen més de 5 m d'altura (Figura 8). Els relleus de major altura, amb més de 10 m de desnivell, són 12, amb una altura màxima al voltant de 22 m. Però, així i tot, independentment de les dimensions considerables que assoleixen alguns penyals càrstics, el nombre de pinacles de poca altura és molt majoritari i amb freqüència aquests apareixen retallant els flancs o els cims de pinacles complexos.

Pel que fa a les altures mitjanes dels relleus analitzats, sembla més adient fer un tractament diferenciat per a les dues categories que s'han establert als apartats anteriors (vegeu la Taula I). Així doncs, la mitjana dels pinacles *stricto sensu* és de 2,8 m ($n = 79$) i la dels penyals càrstics se situa al voltant de 10,5 m ($n = 25$). La distribució de freqüències entre les distintes classes —que vénen determinades en aquest cas per l'equidistància de les corbes de nivell de la cartografia emprada— es pot consultar a la Figura 8. El problema, ja comentat a l'apartat anterior, dels límits de resolució imposats pels 2 m d'equidistància de les corbes de ni-

vell, introdueix un evident biaix estadístic que afecta els pinacles inferiors a 3 m causant una clara subestimació del seu nombre real. Òbviament aquests mateixos problemes es repeteixen en considerar el tractament estadístic de la superfície de pinacles i penyals.

Superfície dels pinacles

La superfície dels distints elements topogràfics prominents del carst de pinacles de Sa Mitjania va necessàriament associada a la mida de cada piràmide de lapiaz i es correlaciona força bé amb l'altura. Per això moltes de les consideracions anteriors són vàlides també per al tractament de les dades de superfície dels pinacles. En aquest sentit, una característica fonamental que exhibeixen els monticles propis d'aquest tipus d'exocarst és la gran diversitat que presenten pel que fa a les seves superfícies, ja que es poden trobar des de petits pinacles de poc més de 4 m² fins a grans penyals que poden superar els 5.000 m² (Taula I).



Figura 7: Penyal de grans dimensions, formant un complex de com a mínim cinc pinacles més petits, a l'extrem SE del promontori càrstic de Sa Mitjania.

Figure 7: Pinnacle of great dimensions, forming a complex of at least five smaller pinnacles, located at the SE part of the karst area of Sa Mitjania.

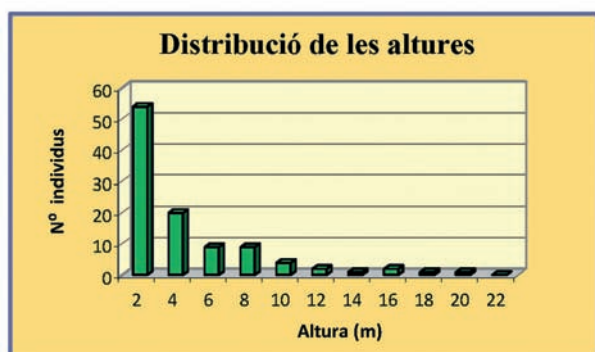


Figura 8: Distribució de freqüències d'altura dels pinacles.

Figure 8: Frequency distribution of the pinnacles' height.

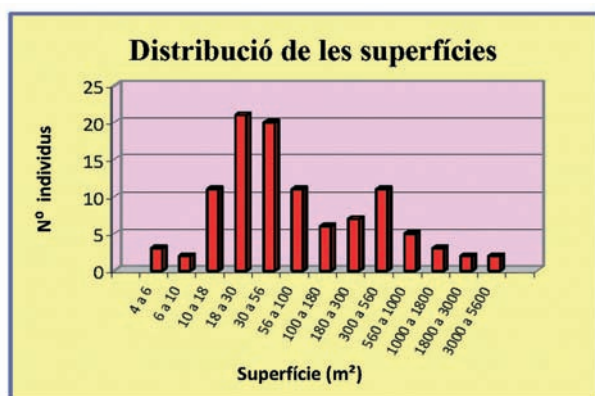


Figura 9: Distribució de freqüències de la superfície dels 104 pinacles *lato sensu*, agrupada en classes que segueixen una escala logarítmica.

Figure 9: Frequency distribution of the area corresponding to the 104 pinnacles *lato sensu*, grouped in classes according to a logarithmic scale.

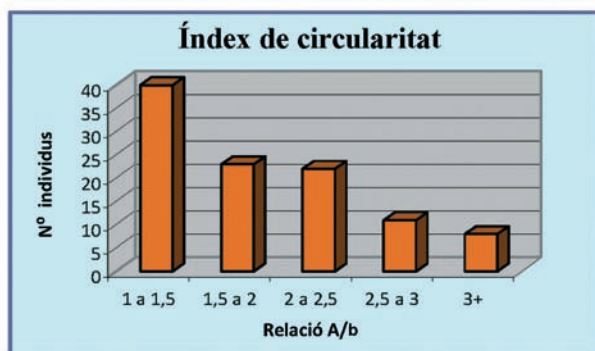


Figura 10: Distribució de freqüències de l'índex de circularitat (relació entre l'eix major i l'eix menor) dels pinacles.

Figure 10: Frequency distribution of the pinnacles' circularity index (major axis against minor axis ratio).

La immensa major part dels relleus del promontori de Sa Mitjania tenen unes superfícies més aviat reduïdes, tal com es pot observar a la gràfica corresponent, que mostra la distribució de freqüències agrupada en classes tot seguint una escala logarítmica (Figura 9). És remarcable que més del 65% dels relleus tenen

una superfície inferior als 100 m² i més del 77% tenen menys de 300 m² (és a dir, corresponen a la pràctica totalitat dels relleus considerats com a pinacles *stricto sensu*). Les classes modals que s'observen a la Figura 9 indiquen que la major part dels pinacles *stricto sensu* tenen una superfície compresa entre els 18 i els 56 m² (51% del total de pinacles) i també que el 78% d'ells tenen una superfície compresa entre 10 i 100 m². La mitjana de superfície d'aquests pinacles se situa en torn a 55,8 m², però es tracta d'un valor molt esbiaixat pels pinacles, poc representatius, que delimiten la transició gradual entre pinacles i penyals.

Les grans prominències o penyals càrstics són relleus molt més amples i complexos, però també menys nombrosos (25 penyals sobre un total de 104 pinacles *lato sensu*), i probablement són el resultat de l'evolució morfològica d'antics relleus residuals. Els penyals càrstics tenen una superfície mínima al voltant dels 300 m² encara que alguns penyals complexos poden assolir superfícies considerables, fins i tot superiors als 4.000 m². D'altra banda, un tret interessant que mostra la Figura 9 és la seva bimodalitat, ja que dins els penyals càrstics destaca una classe modal que correspon a elements topogràfics amb valors de superfície compresos entre 300 i 560 m².

Forma en planta dels pinacles

La forma dels contorns en planta, tant dels pinacles com dels penyals, és molt variada, havent-hi prominències (de diferents mides) gairebé completament circulars, però també el·líptiques, allargassades i amb formes irregulars, generalment lobulades. En qualsevol cas, tot i que els pinacles de planta irregular no es poden mesurar de manera satisfactòria, pareix a bastament útil aplicar als pinacles de Sa Mitjania un **índex de circularitat** (mitjançant el qual es relaciona l'eix major A amb l'eix menor b del pinacle; és a dir, A/b) per tal d'obtenir una visió més objectiva de les proporcions amb què es presenten algunes de les distintes formes. Les dades obtingudes apareixen a la Taula I.

La Figura 10 resumeix els resultats dels càlculs de l'índex de circularitat dels 104 pinacles *lato sensu*, si bé la Taula I mostra per separat les dades de pinacles i penyals. Les dues primeres classes de la gràfica agrupen pinacles quasi circulars o el·líptics (índexs compresos entre 1 i 2), mentre que les classes següents (índexs superiors a 2) agrupen relleus allargassats o molt elongats, que corresponen a crestes o a complexos de pinacles. Un percentatge considerable del total de pinacles estudiats (el 38%) mostra un índex de circularitat que no supera el valor 1,5; de manera que la seva forma en planta és bastant rodona. Però a mesura que l'índex de circularitat es fa més gran, el nombre de pinacles disminueix. La predominança dels pinacles de planta circular o moderadament el·líptica és, doncs, evident. Així i tot, cal destacar que un 9% del total dels pinacles exhibeix valors que superen un índex de 3, indicant que es tracta de relleus en forma de cresta. Quant a les mitjanes, els pinacles donen valors de 1,8 (desviació estàndard =

0,6; coeficient de variació = 0,33) i els penyals mostren tendències més el·líptiques, amb un índex mitjà de circularitat de 2,3 (desviació estàndard = 0,7; coeficient de variació = 0,3).

La majoria dels pinacles de menors dimensions apareixen a la cartografia com a elements topogràfics simples, amb plantes de forma ovalada o circular. Aproximadament una tercera part dels pinacles *lato sensu* mostra, en canvi, valors d'el·lipticitat prou allargats que els apropiarien més aviat a crestes que a pinacles. Una anàlisi provisional de les orientacions que presenten els eixos majors dels pinacles de Sa Mitjania ha demostrat un clar predomini de les següents direccions: NW-SE ($n = 32$), N-S ($n = 18$), NNW-SSE ($n = 18$), NE-SW ($n = 14$) i NNE-SSW ($n = 13$); aquestes direccions preferents estan fortament relacionades amb les principals línies de fractures que afecten el sector (vegeu la Figura 3). Molt més disperses són les direccions que es poden reconèixer entre els penyals de grans dimensions. De fet, les formes en planta dels grans penyals són molt menys uniformes i abunden els contorns irregulars. La variació de formes és molt gran: bilobulades (en forma de ronyó, bumerang o papallona), plurilobulades (en forma d'ameba) o geomètriques (formes triangulars o quadrangulars). Però en canvi les formes el·líptiques són molt infreqüents i no hi ha cap penyal amb planta realment circular. És significatiu que una quarta part del total de pinacles *lato sensu* mostren formes irregulars i que, a més, tots aquests individus sense cap excepció, abracen superfícies de més de 200 m². Alguns d'ells estan constituïts per complexos de pinacles agrupats i d'altres són probablement relleus residuals. Això explicaria que el predomini de les plantes irregulars sigui una característica pròpia dels penyals càrstics.

Pendents dels costers dels pinacles

Un dels trets que millor caracteritzen les piràmides de lapiaz del carst de pinacles de Sa Mitjania (i de tots els camps de lapiaz de la Serra de Tramuntana on hi predominen els pinacles) és el seu pendent, molt verticalitzat, que en la majoria dels casos dona lloc a uns costers extremadament abruptes. Per això s'han realitzat les mesures i els càlculs necessaris per tal d'avaluar els pendents dels costers de la totalitat dels 104 relleus positius que es poden identificar a la topografia que serveix de base per a la realització d'aquest estudi (Figura 4). Cal indicar que els pendents mínim i màxim de cada pinnacle o penyal càrstic corresponen respectivament als costers que vénen delimitats per l'eix major i l'eix menor de cada relleu. Aquest fet produeix evidentment uns resultats molt distints quan es mesuren pinacles de planta circular i pinacles de planta el·líptica o molt elongada: els primers, com què tenen forma de pinnacle, torre o pilar, presenten pendents considerables a ambdós costats; mentre que els segons, en tenir forma de crestalls (*ridges* en la bibliografia internacional en anglès), són més diversos en volum i topografia, i els seus pendents

poden ser prou diferents en les dues direccions ortogonals que delimiten respectivament els seus eixos major (A) i menor (b).

La major part dels costers dels pinacles i penyals de Sa Mitjania (és a dir, més del 80%) tenen pendents compresos entre 20° i 60°, però s'observa una diversitat de valors que va des de rosts gairebé verticals, que arriben a superar els 70°, fins a costers tan suaus que amb prou feines assoleixen 10° d'inclinació (Taula I). Si s'agrupen les 208 dades de pendents de costers en classes separades de 5 en 5 graus, la classe modal que destaca és la de 36° a 40° ($n = 30$). Però si es representen a la mateixa gràfica (Figura 11) les distribucions de freqüències corresponents als pendents mínims (seguint l'eix major, A) i als pendents màxims (seguint l'eix menor, b), es pot apreciar una clara disparitat entre els dos tipus de costers, amb un desfasament important que afecta els valors centrals de les dues distribucions de freqüències per separat. Òbviament això queda ben reflectit als paràmetres de les dues sèries estadístiques: en efecte, mentre la mitjana dels pendents màxims és de 46,8° (desviació estàndard = 11,3°; coeficient de variació = 0,24), la mitjana dels pendents mínims és només de 27,2° (desviació estàndard = 10,1°; coeficient de variació = 0,37).

Atenent a la distinció que s'ha fet al llarg d'aquest estudi, entre pinacles *stricto sensu* i penyals càrstics, cal remarcar que s'observen algunes diferències significatives entre els dos col·lectius, especialment pel que fa a les dades dels seus pendents mínims (Taula I). La mitjana dels pendents mínims dels costers dels pinacles petits és de 29,5°, enfront dels 20° que presenten els pendents mínims dels costers dels penyals. És probable que aquesta diferència de gairebé 10° estigui associada amb la major el·lipticitat pròpia dels penyals, característica que ja ha estat analitzada a un paràgraf anterior. En canvi la mitjana dels pendents màxims és fins i tot superior en els penyals, ja que la mitjana de 51,4° els fa aproximadament 6° més abruptes que la mitjana dels pinacles més petits (45,4°).

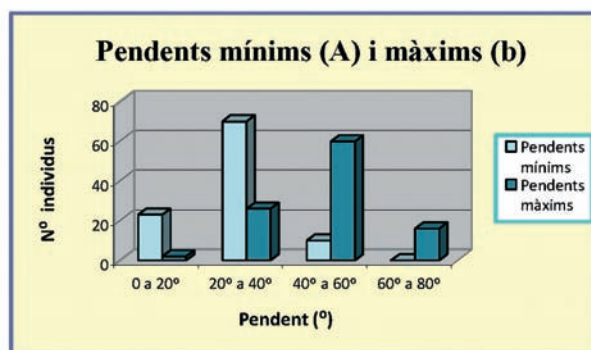


Figura 11: Distribucions de freqüències dels pendents dels pinacles. Els pendents mínims es refereixen als costers corresponents a l'eix major de cada pinnacle. Els pendents màxims es refereixen als costers corresponents a l'eix menor de cada pinnacle.

Figure 11: Frequency distribution corresponding to the dipping of the pinnacles' slopes. The minimum dipping values correspond to the major axis of each pinnacle. On the other hand, the maximum dipping values were measured along the minor axis of the pinnacles.

Cotes a peu de pinacle

Un dels aspectes que podria aportar informació rellevant sobre l'evolució del relleu del promontori de Sa Mitjania (Figura 12) i sobre els probables processos de dissecció relacionats amb l'encaixament dels torrents del Gorg des Diners i de s'Al-lot Mort, que l'envolten, seria l'eventual presència de nivells més o manco esglaonats que haguessin pogut quedar enregistrats en forma de relleixos a la topografia de l'exocarst. Va ser amb la intenció d'explorar aquesta possibilitat que s'ha tabulat per a cada pinacle la cota de peu de pinacle, estimada 1 metre per davall de la primera corba tancada (més externa) que delimita cada prominència del relleu (Taula I). Caldria esperar que l'existència de relleixos aniria associada a una major freqüència de determinades cotes de peu de pinacles, ja que, si de cas, molts pinacles tindrien les seves bases relacionades altimètricament amb superfícies d'aplanament, les quals haurien estat anivellades pels mecanismes d'erosió en temps remots i en un context ben diferent de l'actual. És important destacar que, segons la bibliografia més recent, es considera que la gènesi dels pinacles esdevé sobretot com a resultat de llargs processos de corrosió sota coberta edàfica, de manera que antics *stone teeth*, exhumats per l'erosió del sòl, es van convertint després en pinacles escarpats (CHEN *et al.*, 1986; FORD *et al.*, 1996; KNEZ *et al.*, 2003; FORD & WILLIAMS, 2007; ZSENI, 2009).

Certament, la representació gràfica que apareix a la Figura 13 permet distingir tres puntes de major freqüència, que corresponen als següents intervals: 460 a 480 metres s.n.m. ($n = 14$); 490 a 510 metres s.n.m. ($n = 17$); i 530 a 570 metres s.n.m. ($n = 63$). La classe que reuneix una més alta freqüència de peus de pinacles se situa a 550-560 metres s.n.m., amb un màxim de 26 pinacles. Tanmateix si, en lloc dels 104 pinacles inventariats, es pren en compte el nombre addicional de 40 pinacles que en resulten de considerar també els cimals petits en què cal subdividir els 13 pinacles complexos, la gràfica no canvia substancialment, i es mantenen i fins i tot es re-

forcen les tres puntes prèviament indicades, amb una freqüència encara major per als intervals de 490 a 510 metres s.n.m. ($n = 19$) i 530 a 570 metres s.n.m. ($n = 88$). En canvi, la quasi total absència de peus de pinacles es concentra alternativament en tres puntes de mínims, que corresponen als següents intervals altimètrics: 440 a 460 metres s.n.m. ($n = 2$); 480 a 490 metres s.n.m. ($n = 0$); i 510 a 520 metres s.n.m. ($n = 1$). Una interpretació raonable de l'esmentada gràfica (Figura 13) sembla suggerir la presència al promontori de Sa Mitjania de tres relleixos principals, a partir dels quals arrenquen la quasi totalitat dels pinacles que s'han pogut identificar a la cartografia de base; pinacles que apareixen inventariats, junt amb les seves dades corresponents, a la Taula I.

Cotes de cim de pinacle

També els cims dels pinacles poden aportar informacions valuoses de caire geomorfològic, especialment si els processos de dissecció haguessin actuat sobre un paleorelleu suposadament continu i quasi horitzontal. Si aquest fos el cas, la presència de nivells de cims en els relleus residuals que en resultessin podria constituir una dada significativa. Va ser amb la intenció d'explorar aquesta possibilitat que s'ha tabulat pinacle per pinacle la cota dels cims dels 104 pinacles i penyals inventariats, estimada 1 metre per sobre de la corba tancada (més interna) que delimita el punt més prominent de cada relleu (Taula I). Una major freqüència de determinades cotes de cim de pinacles ajudaria a la delimitació d'eventuals superfícies d'erosió antigues en curs de destrucció pels processos erosius actuals.

De manera anàloga al que succeïa amb les cotes de peu de pinacle, la representació gràfica que apareix a la Figura 13 permet distingir tres puntes de major freqüència, que corresponen als següents intervals: 460 a 480 metres s.n.m. ($n = 15$); 490 a 510 metres s.n.m. ($n = 14$); i 530 a 580 metres s.n.m. ($n = 67$). La classe que re-

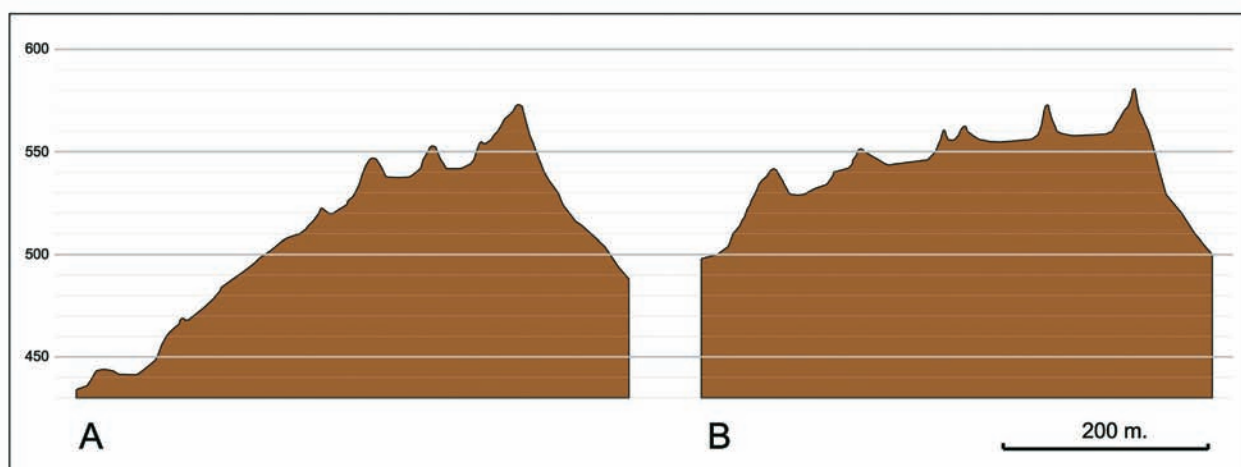


Figura 12: Perfils topogràfics del promontori càrstic de Sa Mitjania. La direcció dels dos talls apareix indicada amb les lletres A i B a la Figura 4. El denominador de l'escala horitzontal és el doble que el de l'escala vertical, per tal d'exagerar lleugerament el relleu.

Figure 12: Topographical profiles crossing the karst area of Sa Mitjania. The location of the two profiles is indicated in Figure 4, with the capital letters A and B. The denominator of the horizontal scale is twice the vertical scale, in order to obtain a vertical exaggeration of the relief.

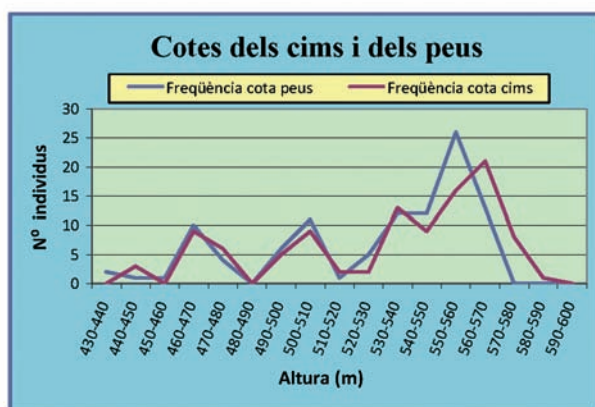


Figura 13: Gràfic que permet comparar la distribució de freqüències de les altituds que presenten els peus dels pinacles amb les altituds que delimiten els cims dels pinacles. El solapament molt perfecte que mostren les dues gràfiques pot estar relacionat amb l'existència de tres esglaonaments, produïts per sengles etapes d'aixecament tectònic.

Figure 13: Plot allowing the comparison between the frequency distribution of the elevation of the pinnacles' bases and the elevation of their summits. The perfect overlap of the two graphs may be related to the existence of three major steps, produced by several phases of tectonic uplift.

uneix una més alta freqüència de cims de pinacles correspon a 560-570 metres s.n.m., amb un màxim de 21 individus. La quasi total absència de cims de pinacles es concentra igualment en tres puntes, que corresponen als següents intervals altimètrics: 450 a 460 metres s.n.m. ($n = 1$); 480 a 490 metres s.n.m. ($n = 0$); i 510 a 530 metres s.n.m. ($n = 4$). Aquesta gràfica sembla suggerir, doncs, l'existència al promontori de Sa Mitjania de tres nivells de cims, que agrupen la quasi totalitat dels extrems punxeguts dels pinacles que s'han pogut identificar a la cartografia utilitzada (Taula I). La comparació entre ambdues gràfiques –la de les cotes dels relleixos d'on arrenquen els pinacles i la de les cotes dels nivells que formen els cims dels pinacles– es pot visualitzar a la mateixa Figura 13. S'hi observa que la superposició de les dues gràfiques mostra un solapament quasi perfecte, que només presenta un sorprenent decalatge entre els pics superiors que delimiten els seus dos màxims: així, mentre el relleix superior sembla associat amb el màxim de cotes a peu de pinacle que apareix entre 550 i 560 metres s.n.m., el nivell de cims més important apareix localitzat entre 560 i 570 metres d'altitud; és a dir, 10 metres per damunt de l'esmentat relleix superior.

Conclusions

El present treball constitueix fonamentalment un assaig d'aplicació de mètodes morfomètrics al cas concret de les formes de lapiaz de major mida, com són els pinacles. Al mateix temps s'ha volgut realitzar una descripció renovada –molt acurada i fins i tot prou minuciosa– d'un dels camps de lapiaz més remarcables de la Serra de Tramuntana. Es deixa així oberta la possibilitat d'efectuar comparacions quantificables i rigoroses entre els pinacles, tan característics dels camps de lapiaz ma-

llorquins, i també entre ells i els altres carsts de pinacles d'arreu del món.

Al nostre parer, caldria destacar els següents resultats com a principals conclusions del present estudi:

— S'ha elaborat una nova versió digitalitzada de la cartografia geomorfològica de Sa Mitjania a escala 1/2.000 i amb equidistància de corbes de nivell de 2 m (prèviament publicada a GINÉS, 1990), amb l'objectiu d'utilitzar-la per a efectuar amidaments amb criteris estadístics dels pinacles que estructurin el seu lapiaz.

— Es presenta, segurament per primera vegada a la bibliografia existent, una àmplia sèrie de dades morfomètriques –obtingudes a nivell d'un camp de lapiaz sencer– sobre les formes de lapiaz de major mida (és a dir, mesokarren i makrokarren = morfologies compreses entre 1 m i més de 10 m; vegeu-ne GRIMES, 2007). Al mateix temps, aquestes mesures permeten avaluar els percentatges de superfície exocàrstica ocupada pels pinacles de lapiaz (10% del total, en Sa Mitjania) i quantificar així l'abast del seu predomini en el paisatge.

— El conjunt de dades resultant ofereix una descripció detallada d'un típic carst de pinacles mediterrani, en base a un amidament exhaustiu de totes les formes prominents identificables a la cartografia (un total de 104 individus, que suposen un mostreig a bastament significatiu). Els paràmetres, que han servit de base per a l'elaboració de la Taula I i conseqüentment per a la caracterització de la forma dels pinacles, han estat els següents: altura, longitud de l'eix major, longitud de l'eix menor, superfície, pendent de l'eix major i pendent de l'eix menor.

— La densitat de pinacles és molt elevada al camp de lapiaz de Sa Mitjania i ben probablement ultrapassa un valor de 10 pinacles per hectàrea al llarg de tota la seva superfície exocàrstica. Emperò, el càlcul de la densitat de pinacles és només aproximatiu, especialment si es considera l'abundància de pinacles petits difícils de discriminar, ja que poden ser subestimats en no ser distingibles a la cartografia. Lamentablement no existeix cap dada de densitat de pinacles a la bibliografia disponible i no és possible efectuar cap comparança amb altres carsts d'aquesta tipologia.

— Encara que hi ha una manca d'estudis equivalents als diversos carsts de pinacles tropicals, és evident que els pinacles de Sa Mitjania no són tan alts com els famosos exemples de Mulu (Sarawak), Lunan (Xina) o Bemaraha (Madagascar), ja que només un 11% superen els 10 m, amb una altura màxima de 22 m. D'altra banda, si bé els pendents dels seus flancs són considerables i assoleixen mitjanes de més de 45°, mai arriben a presentar la verticalitat dels pinacles en forma de columna o pilar que tant abunden al Shilin de Lunan i als carsts de pinacles tropicals en general.

— A causa de l'esmentada mancança de dades morfomètriques, és molt difícil establir comparacions rigoroses sobre les característiques geomètriques dels pinacles d'arreu del món, especialment pel que fa a la seva superfície, forma en planta i pendents dels costers. En el cas concret del carst de pinacles mediterrani de Sa Mitjania hi predominen pinacles en forma de piràmide (més del 60%), amb un percentatge important de crestalls elongats (al voltant del 10%); emperò, cal remarcar que si aquest estudi s'hagués fet als Pixarells

de Lluc aquestes proporcions haurien estat, de segur, ben diferents.

— La forma en planta dels pinacles –i més específicament la direcció dels seus eixos majors– mostra una clara concordança amb les línies de fracturació que s'observen mitjançant fotografia aèria (Figura 2). És probable que la distribució i freqüència de diàclasis i falles, així com la proximitat o espaiament de les fractures, sigui la causa de què en alguns camps de lapiaz els pinacles elongats en forma de cresta (topografia en *ridges and trenches*) superin en nombre als típics pinacles en forma de piràmide.

— El tret més destacat del promontori càrstic de Sa Mitjania (Figures 3, 4 i 12) és sens dubte el seu accidentat relleu, que el fa gairebé inaccessible. Apareix vorejat per pendents molt escarpats, dins un context geomorfològic que mostra la profunda incisió de dos torrents càrstics, i presenta una zona culminant relativament aplanada. L'estudi de les cotes dels peus i dels cims dels pinacles pareixen indicar l'existència de tres esglaiaments, lligats tal vegada a successives etapes d'aixecament tectònic.

— L'enèrgic relleu de Sa Mitjania queda accentuat pels pendents molt verticalitzats dels seus nombrosos pinacles. Mitjanes de pendent (dels costers dels pinacles) compreses entre 30° i 50°, així com una proporció significativa de costers amb més forta inclinació (entre 50° i 70°), donen una idea del grau de dificultat que comporta transitar per aquests terrenys. És probable que els costers dels pinacles dels carsts tropicals siguin encara més escarpats, però hi manquen dades estadístiques.

— La necessitat d'establir una estratègia de mostreig adient ens ha obligat a dedicar una especial atenció a la tipologia dels pinacles; diferenciant en una primera aproximació entre pinacles simples i complexos, fins arribar progressivament –amb l'ajut del tractament estadístic– a una distinció addicional entre pinacles *stricto sensu* i penyals. Els penyals serien, segons el nostre criteri, relleus residuals de grans dimensions, simples o complexos, de contorns generalment irregulars, que assoleixen una extensió superior als 300 m² i una altura mitjana per sobre dels 10 m, i que representen a Sa Mitjania quasi el 25% del total dels relleus prominents que es poden apreciar. A falta d'estudis morfomètrics en altres carsts de pinacles del món, ignorem si aquesta diferenciació pot tenir també validesa a altres localitats.

Agraïment

La cartografia que ha servit de base per a l'elaboració del present treball fou realitzada –l'any 1989– gràcies a la bona predisposició i facilitats brindades per D. Joaquín Rodríguez, aleshores director-gerent de l'*Empresa Municipal d'Informàtica S.A.* (actualment, l'*Institut Municipal d'Innovació* de l'Ajuntament de Palma). L'equipament fotogramètric de l'esmentada institució possibilita la generació de cartografies geomorfològiques detallades d'alguns indrets destacables de la Serra de Tramuntana.

Bibliografia

- BÄR, W.F. (1989): Atlas Internacional del Karst. Hoja 5: Lluc / Sierra Norte (Mallorca). *Endins*, 14-15: 27-42. Palma de Mallorca.
- BÖGLI, A. (1980): *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Springer-Verlag. 284 pàgs. Berlin, Heidelberg, New York.
- CHEN, Z.P.; SONG, L.H. & SWEETING, M.M. (1986): The pinnacle karst of the Stone Forest, Lunan, Yunnan, China: an example of a sub-jacent karst. In: PATERSON, K. & SWEETING, M.M. (eds.) *New directions in karst*. Geo Books. 597-607. Norwich.
- DAY, M. & WALTHAM, T. (2009): The pinnacle karrenfields of Mulu. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Založba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 423-432. Ljubljana, Eslovènia.
- DREW, D. (1985): *Karst Processes and Landforms*. Aspects of Geography, Macmillan Education. 63 pàgs. London.
- FORD, D. & WILLIAMS, P. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley and Sons Ltd. 562 pàgs. Chichester.
- FORD, D.C.; SALOMON, J.N. & WILLIAMS, P.W. (1996): Les 'Forêts de Pierre' ou 'Stone Forests' de Lunan (Yunnan, Chine). *Karstologia*, 28 (2): 25-40.
- GINÉS, A. (1998): L'exocàrst de la serra de Tramuntana de Mallorca. In: FORNÓS, J.J. (ed.) *Aspectes geològics de les Balears*. Universitat de les Illes Balears. 361-389. Palma de Mallorca.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1995): Les formes exocàrstiques de l'illa de Mallorca / The exokarstic landforms of Mallorca island. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. *Endins*, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 59-70. Palma de Mallorca.
- GINÉS, A.; GINÉS, J.; POMAR, L. & SALVÀ, P.A. (1979): *La Serra de Tramuntana*. VI Coloquio de Geografía, Excursión nº 1. 38 pàgs. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. (1990): El modelat càrstic de sa Mitjania (Escorca, Mallorca). *Endins*, 16: 17-20. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1989): El karst en las islas Baleares. In: DURÁN, J.J. & LÓPEZ, J. (eds.) *El karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía nº 4: 163-174. Madrid.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009): Mid-mountain karrenfields at Serra de Tramuntana in Mallorca Island. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Založba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 375-390. Ljubljana, Eslovènia.
- GRIMES, K.G. (2007): Microkarren in Australia - a request for information. *Helictite*, 40 (1): 21-23. Sydney.
- GRIMES, K.G. (2009): Tropical monsoon karren in Australia. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Založba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 391-410. Ljubljana, Eslovènia.
- JENNINGS, J.N. (1985): *Karst Geomorphology*. Basil Blackwell Ltd. 293 pàgs. Oxford, New York.
- KNEZ, M.; OTONICAR, B. & SLABE, T. (2003): Subcutaneous stone forest (Trebnje, Central Slovenia). *Acta Carsologica*, 32(1): 29-38.
- OSMASTON, H.A. (1980): Patterns in trees, rivers and rocks in the Mulu Park, Sarawak. Geomorphology of the Mulu Hills. *Geographical Journal*, 146 (1): 33-50.
- SALOMON, J.N. (2009): The Tsingy karrenfields of Madagascar. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Založba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 411-422. Ljubljana, Eslovènia.
- SMART, P.L. & WHITAKER, F.F. (1996): Development of karren landform assemblages - a case study from Son Marc, Mallorca. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 111-122. Palma de Mallorca.
- WILLIAMS, P.W. (1972): Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*, 83: 761-796.
- WILLIAMS, P.W. (2009): Arête and pinnacle karst of Mount Kaijende. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Založba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 433-437. Ljubljana, Eslovènia.
- ZSENI, A. (2009): Subsoil shaping. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Založba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 103-121. Ljubljana, Eslovènia.